http://pmse.scu.edu.cn

有机-无机复合材料在水泥基材料力学性能提升中的应用与研究进展

李慧娜[1], 郑淑珍[1], 周 红[1], 徐守芳[1,2], 马登学[1,2], 李因文[1,2], 马建峰[1,2]
(1. 临沂大学 化学与化工学院,山东 临沂 276000; 2. 临沂大学 材料科学与工程学院 功能高分子实验室,山东 临沂 276000)

摘要:水泥基材料力学性能提升可增强工程安全性,促进经济效益与材料科学发展,对于建筑结构的承载能力和建筑物的长期稳定运行具有十分重要的意义。文中综述了近年来有机聚合物/无机复合材料对水泥基材料力学性能提升的研究进展,分别介绍了聚合物、纤维、无机纳米材料、水化硅酸钙(C-S-H)晶核等在水泥基力学性能提升中的应用和作用机制,总结了目前研究中存在的主要问题,并对今后的研究提出了建议和展望。随着高分子化学、物理化学和水泥化学等多学科交叉领域的不断深化研究,水泥基材料力学性能提升的外加剂已经不再局限于单一纳米材料或聚合物,聚合物纳米杂化材料可能会成为新的研究热点,其能同时发挥有机聚合物和无机纳米材料在水泥基材料中的优势,达到最佳的力学性能提升目标。

关键词:水泥基材料;复合材料;力学性能;纤维;无机纳米材料;水化硅酸钙
中图分类号:TU528 **文献标识码**:A **文章编号**:1000-7555(2025)09-0169-10

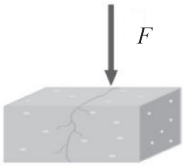
1 水泥基材料力学性能提升的意义

水泥基材料是以水泥为基体的凝胶材料,包括水泥净浆、水泥砂浆及混凝土等[1]。现代水泥工业起源于 1824 年 Joseph Aspdin 获得的波兰特水泥专利[2],从此水泥成为建筑领域应用最广泛的材料[3,4]。改革开放后,我国大力发展基础设施建设和重大工程建设,水泥的使用量不断增加,自 1985 年后,我国水泥产量一直位居世界首位。2024 年,全国水泥产量为 18.25 亿吨。水泥基材料是疏松的多孔材料,存在脆性大、韧性低、易开裂等问题,其物理结构的特殊性导致其弯曲强度远远小于压缩强度,普通混凝土的弯曲强度和压缩强度分别为 2~5 MPa 和 20~50 MPa,弯曲强度仅为压缩强度的 10%。超高性能混凝土具有优异的力学性能,压缩强度高达 120~230 MPa,但其弯曲强度仅为 30~60 MPa[5]。

较低的弯曲强度会导致水泥基材料局部应力集中,进而形成微裂纹[6],降低其韧性,严重影响建筑结构的耐久性和安全性,缩短其服役寿命,极大地限制了其应用范围。现代建筑的快速发展对水泥基材料的性能提出了更高的要求,因此,提高水泥基材料的韧性,延长其服役寿命是重中之重。通过掺杂水泥外加剂来调控水泥基材料的微观结构是提高其宏观性能最简便、最有效的方法。

doi: 10.16865/j.cnki.1000-7555.2025.0167
收稿日期: 2024-09-04
基金项目: 山东省自然科学基金资助项目(ZR2022QE006, ZR2023MB055); 国家自然科学基金资助项目(52208250, 22172070); 山东省青年创新团队(2019KJA021); 大学生创新项目(X202310452288)
通讯联系人: 马建峰, 主要从事功能高分子材料研究, E-mail: m63952289@163.com;
郑淑珍, 主要从事功能高分子材料研究, E-mail: zhenshuzheng@163.com

Tab. 1 Mechanical strength of ordinary Portland cement and ultra-high performance concrete[5]

	Flexural strength/MPa	Compressive strength/MPa	Tensile strength/MPa
Stress diagram			
Ordinary concrete	2~5	20~50	2~4
High performance concrete	6~10	60~100	8~10
Ultra-high performance concrete	30~60	120~230	7~15

2 水泥基材料力学性能调控研究进展

最初在水泥基材料中使用的聚合物是天然聚合物,如天然沥青、糯米水、鸡蛋清等。1923 年,英国工程师克雷斯在天然橡胶中提取了乳液并将其应用于道路材料中,开创了有机聚合物与无机水泥基材料相结合的先河[7]。自此之后,越来越多的研究人员着力于研发新型高分子聚合物材料并应用到水泥基材料中。现如今聚合物外加剂技术已经取得了一系列显著的进展[8],另外,研究人员通过引入纳米颗粒到水泥基材料中,利用纳米颗粒的高比表面积和强化效应来强化水泥基材料的力学性能。纳米级的碳纤维、氧化石墨烯等纳米纤维材料也可提高水泥基材料的柔韧性和抗裂性。综上所述,针对水泥基材料韧性差、脆性大的缺陷,国内外学者围绕纤维增韧、有机聚合物改性、纳米材料调控及水化硅酸钙(C-S-H)纳米晶核调控等方面展开了一系列研究工作。

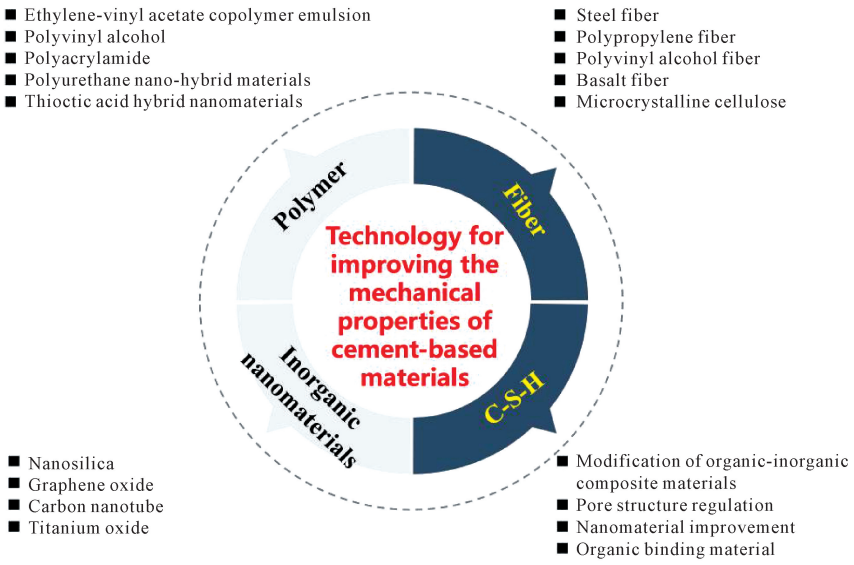


Fig. 1 Various materials that affect the improvement of mechanical properties of cement-based materials

2.1　聚合物材料对水泥基材料力学性能提升的研究进展

2.1.1　聚合物材料提升水泥基材料力学性能的机理:高分子聚合物具有良好的可塑性和高韧性,将其应用于水泥基材料中,聚合物可通过静电或氢键吸附在水泥颗粒表面,延缓水泥早期水化,影响水泥基材料的水化产物和微观结构[9]。聚合物可在水泥颗粒表面形成聚合物薄膜,并占据水化产物的成核位点,抑制硅酸三钙(C_3S)的水化反应,延缓水泥水化产物的成核生长[10]。聚合物薄膜具有较高的渗透性,不会对水泥早期水化造成严重的阻碍,随着时间的推移,聚合物薄膜分散絮凝结构,释放絮凝结构包裹的水,不再抑制水化反应,促进水化产物填充水泥基材料的微孔结构,从而降低孔隙率。

2.1.2　聚合物在提升水泥基材料力学性能中的应用:Heidarnezhad 等[11]以环氧树脂为聚合物外加剂制备了轻质聚合物混凝土,结果表明,环氧树脂能够提升其力学强度,弯曲强度和压缩强度分别提升了 52% 和 32%。在聚合物外加剂中,减水剂是目前应用最广泛的外加剂之一,冉千平等[12]通过原子转移自由基聚合法得到了一种序列结构完全可控的嵌段聚羧酸减水剂,可以有效分散水泥颗粒,提高其工作性。Xu 等[13]采用原位聚合的方法制备了聚丙烯酸钠改性水泥净浆,研究发现,含量为 4% 时水泥净浆弯曲强度和压缩强度分别提升了 109% 和 11.8%。聚丙烯酸酯在水泥基材料中形成了网络结构,在水泥产物之间产生了桥接效应,增强了水泥净浆的宏观力学性能。然而,聚合物改性水泥基材料存在局限性,聚合物中的官能团会与 Ca^{2+} 络合,阻碍水化产物生成,延长水泥的凝结时间,降低水泥的早期压缩强度[14]。而且水化过程中生成的二氧化碳气体会使孔隙率提高,且聚合物链的团聚会导致其在水泥基材料中分布不均,对压缩强度产生负面影响[15]。

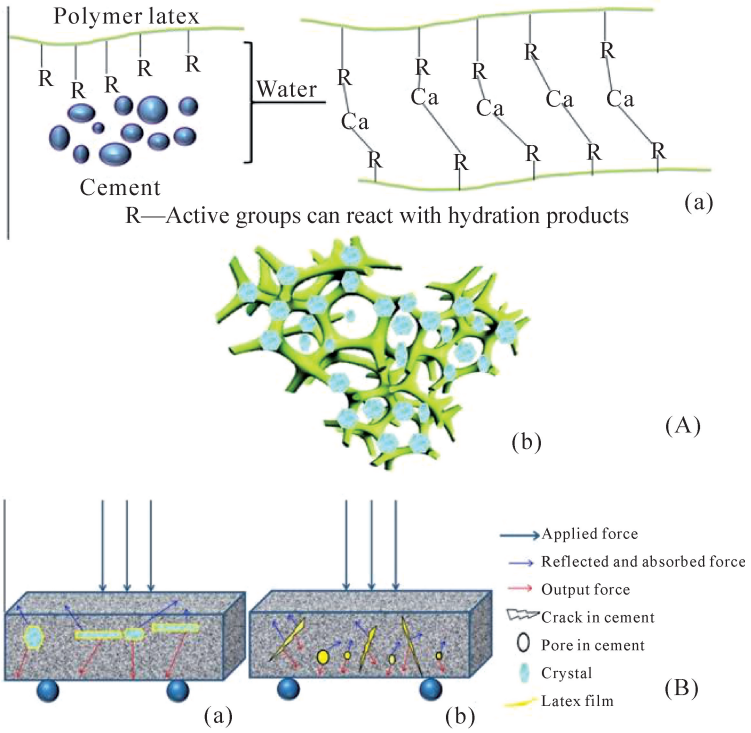


Fig. 2　(A) Chemical model and (B) physical model of polymer latex modified cement[15]

针对聚合物材料的优势和缺陷,笔者课题组设计合成了具有柔性聚氨酯(PU)的二氧化硅纳米杂化材料,并将其作为高效的力学性能增强剂添加到水泥基材料,明显提高了水泥基材料的力学强度。其作用机制表明,添加 PU-二氧化硅纳米杂化材料导致水泥水化产物中出现更多的 C-S-H 相,有助于提

升水泥基材料的力学性能[16]。

有机/无机纳米复合材料可以在微纳米尺度上优化水泥水化产物的微观结构，笔者课题组合成了一种由柔性自主愈合聚合物聚硫辛酸改性的新型纳米杂化材料（LNTS），与对照组相比，添加 1.0‰ LNTS-1 的水泥浆体在养护 3 d，7 d 和 28 d 后弯曲强度分别提高了 11.9%，15.6% 和 16.9%。其作用机制是聚合物纳米杂化材料中的大量羧基与钙离子之间产生了静电吸附，导致氢氧化钙（CH）和 C-S-H 成核生长。同时，纳米二氧化硅（NS）的火山灰反应消耗了大量的 CH，生成额外的 C-S-H。这些因素共同促进了水泥浆体力学性能的提升[17]。

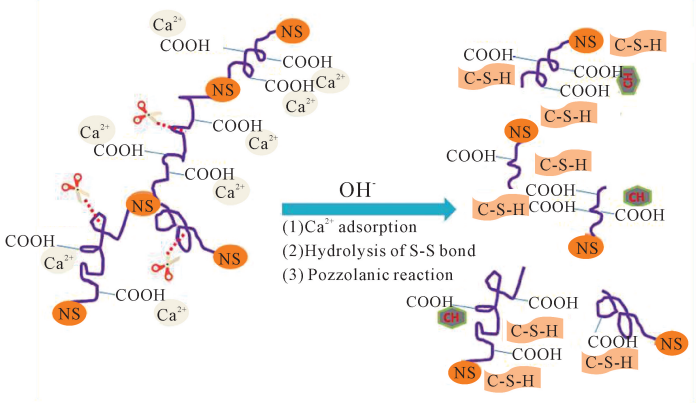


Fig. 3 Action mechanism of nano-hybrid on cement hydration products[17]

2.2 纤维材料对水泥基材料力学性能提升的研究进展

2.2.1 纤维材料提升水泥基材料力学性能的机理：纤维在水泥基中作为传统增强材料的应用已经十分广泛。常用的纤维根据化学成分可以分为两类，一种是聚合纤维，如聚乙烯醇纤维、聚乙烯纤维，另一种是无机纤维，如玄武岩纤维等[18]。在水泥基材料中掺杂具有显著抗裂性、高强度、高韧性的纤维，可以增强水泥基材料的承载能力和耐久性。纤维在水泥基体中形成桥联网络，通过界面黏结和摩擦作用传递应力并约束裂缝发展。纤维的塑性变形能有效吸收断裂能，从而增强基体的抗裂性和韧性[19]。

2.2.2 纤维材料在提升水泥基材料力学性能中的应用：为了使水泥基复合材料的力学性能均匀，纤维在基体中的均匀分散至关重要，这不仅要求基质的孔隙率尽可能低，良好的纤维配比也十分重要。舒晓娟等[20]通过单一混合实验和正交试验优化了水泥基灌浆材料配比，并设计出了一种纤维-聚合物复合材料。与对照组相比，不同龄期的压缩强度分别提高了 45.9%，28.5% 和 2.2%，弯曲强度分别提高了 43.1%，27.3% 和 53.5%。

笔者课题组通过将微晶纤维素（MCC）和 NS 改性混合合成了 MCCNS 材料，将其加入到水泥净浆中，实验发现，在质量分数 1.0‰ 的低掺量时，MCCNS-1 水泥浆体在养护 1 d，7 d，28 d 和 56 d 后的弯曲强度分别提高了 47%，20%，6.3% 和 6.8%。压缩强度分别提高了 14.4%，6.3%，6.8% 和 6.5%。纳米杂化材料通过表面吸附钙离子延缓水泥水化，同时其火山灰效应消耗 CH 并促进 C-S-H 生成，从而提升水泥基材料力学性能[21]。

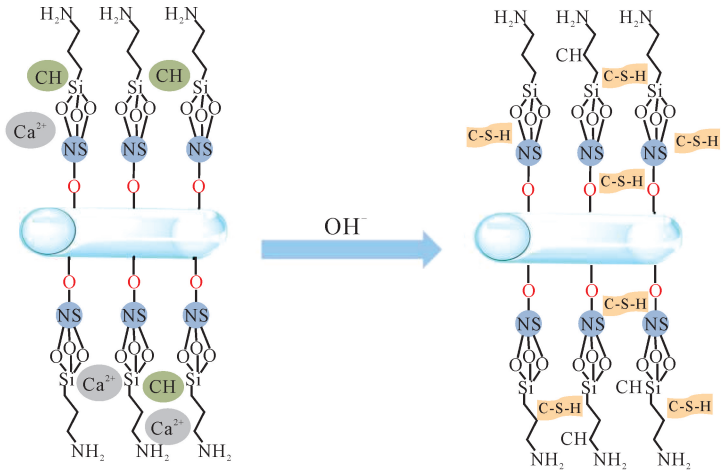


Fig. 4 Effect mechanism of MCCNS nano-hybrid materials on cement hydration products[21]

芮瑞等[22]对聚甲醛(POM)纤维在超高性能混凝土(UHPC)中的应用进行了探究,POM 纤维对 UHPC 的压缩强度增强效果不明显,但能够提升弯曲强度。当 POM 纤维掺量增加时,更多的 POM 纤维在裂缝处使应力分散,吸收应变能,控制大裂缝的扩展,形成更多的微裂缝,从而提高抗裂性能和弯曲强度。纤维的加入不仅提高了水泥基材料的弯曲强度,而且相对单一纤维-水泥基材料而言,纤维-聚合物和纤维-无机纳米复合材料增强水泥基材料力学性能可以获得更好的效果。

钢纤维作为金属纤维在水泥基材料中应用十分广泛,将其掺入水泥基复合材料中可以限制材料中裂纹的萌生和扩展,提高拉伸强度、断裂能和韧性[23]。其增强水泥基复合材料力学性能的方法主要有 3 种——水泥基复合材料的力学增强、钢纤维的物理排列和钢纤维表面的化学改性[24]。Yoo 等[25]探究了聚乙烯纤维与钢纤维在增强混凝土中的应用,通过对比不同类型钢纤维对 UHPC 拉伸强度的影响,发现扭曲型钢纤维的增强作用最明显。

王嘉庆等[26]等将聚乙烯醇(PVA)纤维引入混凝土中,均匀分布的纤维通过其桥接效应抵消了部分内部拉力,为混凝土提供了三维加固结构,阻止了大裂缝的产生,提高了混凝土的韧性。玄武岩纤维作为一种绿色、可持续发展的建筑材料[27],利用其较好的相容性可采用聚乙烯醇/玄武岩纤维增强混杂纤维 ECC,当玄武岩纤维掺量增加到 1.2% 时,其压缩强度和应变分别达到最大值 46.37 MPa 和 0.47%[28]。

2.3　无机纳米材料对水泥基材料力学性能提升的研究进展

2.3.1　*无机纳米材料提升水泥基材料力学性能的机理*:无机纳米材料具有强度高、硬度大、延展性好等优良的力学性能,在提升水泥基材料力学性能方面发挥着重要作用。纳米颗粒通过物理填充效应能有效密实水泥基体,优化孔隙结构,同时作为水化反应活性位点,纳米材料能加速水泥水化进程并调控水化产物分布,这种多尺度界面结构进一步强化了材料整体性能,多机制的协同作用使水泥基材料在宏观力学性能上获得显著提升[29]。

2.3.2 *纳米材料在提升水泥基材料力学性能中的应用*

(1)纳米二氧化硅:NS 的掺量对水泥净浆的力学性能有显著影响[30]。Mohammed 等[31]发现,当 NS 掺量不高于 2% 时,能够减少普通硅酸盐水泥净浆中的孔隙,提高硬化水泥净浆的密实度,从而有效增强水泥净浆的强度。Wang 等[32]研究了 NS 对石灰石煅烧黏土水泥压缩强度的增强作用,NS 掺量为 1% 和 2% 时能够显著提高净浆的早期压缩强度,机理研究发现,NS 能够细化水泥净浆的孔隙结构,提高硬化水泥浆体的致密度。

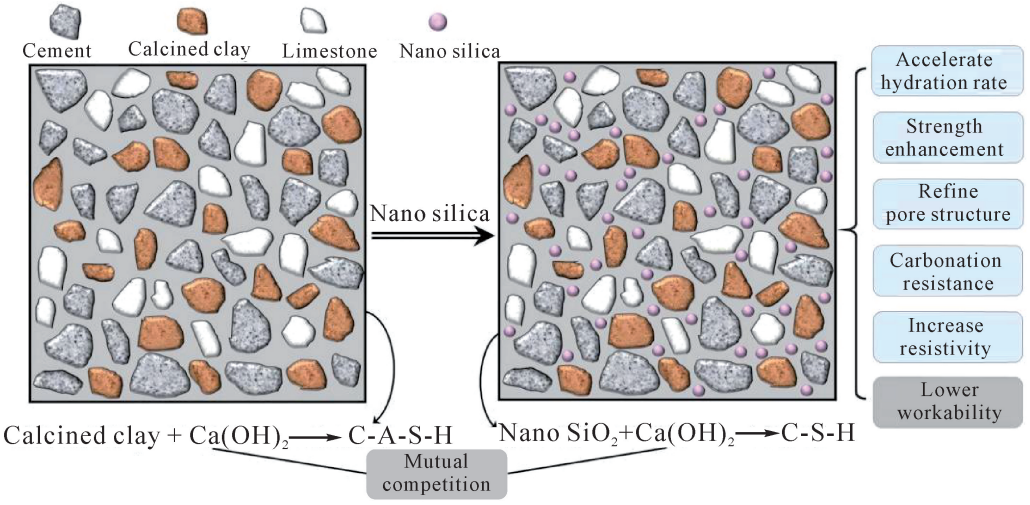


Fig. 5　Role of nano-silica in calcination of limestone in clay cement system[32]

NS 粒径会影响水泥基材料的力学性能。Gu 等[33]综合探究了 NS 粒径和掺量对粉煤灰-普通硅酸盐水泥基复合材料的影响，结果表明，NS 的火山灰效应能促进二次水化，填充复合材料的孔隙结构。

(2)碳纳米管和碳纳米纤维：除 NS 外，碳纳米管(CNT)也常用于水泥基材料，通过改善水泥基材料的孔隙结构来提升水泥基材料的力学性能。CNT 具有很高的长径比，在微观尺度上可以广泛而密集地分布，覆盖更长的长度。使用 CNT 作为水泥基复合材料的增强剂可以提供良好的强度、弹性、抗疲劳性和各向同性性能[34]。

Aodkeng 等[35]发现 CNT 能够改善水泥净浆的力学性能，并且能够促进水泥净浆的早期水化。但当掺量较高时，CNT 会出现团聚现象，导致压缩强度下降。其分散性是影响水泥基复合材料性能优化程度的决定性因素。CNTs/CNF 掺入水泥基体后，若未得到有效分散，不仅会对复合材料的性能产生负面影响，而且会影响水泥的水化过程和后期强度的发展。甚至在团聚体周围也会产生应力集中，从而引发局部裂纹的发生，并对水泥部件的适用性产生不利影响[36]。目前主要的分散方法有机械分散、超声分散、电场诱导、表面改性等。

(3)氧化石墨烯：氧化石墨烯(GO)是一种碳基纳米材料，适量 GO 能够增强水泥基材料的力学性能。Zhao 等[37]研究发现，GO 掺量为质量分数 0.6‰时，水泥净浆和砂浆的弯曲强度、压缩强度及分裂拉伸强度均显著提升，而掺量过高时，GO 分布不均匀，进而对水泥净浆的收缩变形产生不利影响。由于在水泥水化过程中，水泥熟料 C_3S 表面形成富硅层，其周围吸附的 Ca^{2+} 数量随水化过程的推进而增多，影响水泥熟料的水化反应。加入适量 GO 后，GO 的含氧官能团对 Ca^{2+} 的吸附作用降低了富硅层周围 Ca^{2+} 的浓度，促进了 C_3S 的水化反应[38]。

然而，纳米材料由于其较高的表面活性，在碱性的水泥浆体环境中极易发生团聚而分布不均匀，导致水泥基材料受力不均，影响水泥基材料的后期强度[39]。笔者课题组为了解决水泥分散问题，首先合成了一系列具有不同功能基团的小分子多齿聚合物，研究发现，聚合物 IHP-MP 作为水泥分散剂，不仅具有良好的减水保坍性能，而且其结构上大量的磷酸基团使其具有显著的水泥水化延缓效果[40]。

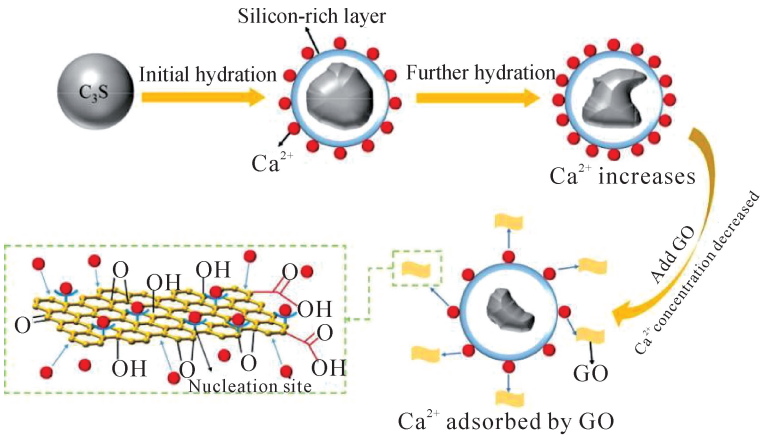


Fig. 6 Adsorption mechanism of GO on Ca^{2+} in pore solution[38]

2.4 C-S-H 晶核调控对水泥基材料力学性能提升的研究进展

2.4.1 水泥水化产物——水化硅酸钙凝胶(C-S-H)：水泥主要由石灰石和黏土矿物经过煅烧而得到，主要成分为氧化钙(CaO)、硅酸三钙、硅酸二钙(C_2S)、铝酸钙(C_3A)和铁铝酸四钙(C_4AF)[41]。水泥和水混合时会发生水化反应，水泥中的 C_3S 和 C_2S 水化生成一种无定形的物质，是硅酸盐水泥的主要水化产物。这些反应生成 C-S-H 和 $Ca(OH)_2$，C-S-H 是水泥硬化后最主要的成分，是决定水泥基材料力学性能的主要水泥水化产物，其含量约为总水化产物的 70%。所以，通过调控水泥水化产物 C-

S-H 晶核的形成和生长来提升水泥基材料的力学性能是非常有意义的。

2.4.2 *孔结构改性*:在微观结构上来说,可以通过优化配料和工艺,调控水泥基材料的孔隙率和孔径分布,使 C-S-H 晶体分布更均匀,从而提高材料的密实度和强度。Nathanial 等[42]通过纳米力学测试、微观结构和孔隙结构表征等方法,发现质量分数 12% 的纳米二氧化硅可使高密度和超高密度的 C-S-H 相对数量在原来的基础上增加 30.8%,而 C-S-H 凝胶孔隙率降低 16.7%,总孔隙率降低 24.4%,断裂韧性提高 3.9%。郭锦棠等[43]通过化学复合 GO 与纳米二氧化硅,与物理混合的 GO/NS 相比,化学复合得到的 GO-NS 能够更均匀地分散在水泥中,更好地提供多个水泥水化反应的成核反应位点,从而促进水泥更高程度的水化反应,同时 GO-NS 作为 C-S-H 的生长和沉淀平台,可以形成更致密的 C-S-H 网络,能够插入 C-S-H 并诱导更深层次的交联,达到改善 C-S-H 微观结构的作用,从而提升水泥基材料的力学性能。

2.4.3 *有机无机复合材料改性*:利用聚合物改性思路对 C-S-H 进行改性也是非常有效的手段,比如引入聚羧酸减水剂(PCE)作为分散剂,降低 C-S-H 的聚集性,显著提升水泥净浆早期力学性能[44]。Kanchanason 等[45]制备了 C-S-H-PCE 纳米杂化材料,掺加这种材料的水泥砂浆早期强度比对照样品高 470%~690%。李伟峰等[46]发现,C-S-H-PCE 纳米杂化材料在质量分数为 0.6% 时,其水泥砂浆压缩强度提高 18.97%,并且能够有效地修饰砂浆孔隙,总孔隙率降低 25.77%。通过使用外加剂,如硅酸盐、磷酸盐、氟化物等,可以加速水泥的水化反应,促进 C-S-H 晶体的快速生成。

2.4.4 *物理条件改性*:除了化学层面通过外加剂来改性,物理角度上可以通过控制反应条件来调控 C-S-H 晶核,比如通过控制温度湿度和养护时间来优化 C-S-H 晶体的生长条件,使其获得更为均匀和致密的微观结构,适当的延长养护时间可以使 C-S-H 晶体充分生长和成熟,提升材料的整体力学性能。通过以上方法,可以有效调控 C-S-H 晶核的生成和生长,提升水泥基材料的力学性能。这些方法不仅可以优化水化反应过程,还能改善材料的微观结构,从而实现性能的综合提升。

3　总结与展望

本文综述了近年来有机聚合物/无机复合材料对水泥基材料力学性能提升的研究进展。分别介绍了纤维、无机纳米材料、聚合物等可以提升水泥基力学性能的外加剂材料,并从微观层面分析了 C-S-H 晶核调控对水泥基材料力学性能的影响。通过针对不同物质的结构进行改性复合出新的具有良好性能的复合材料。这些材料可以通过促进水泥基材料的水化反应等机理来增强水泥基材料的力学性能。然而,某些聚合物的生产成本较高,且容易发生团聚,不同聚合物、纤维和纳米材料与水泥基材料之间的相容性、复杂工艺要求及长期性能不确定性等问题仍需进一步研究和解决。未来,随着材料科学和工艺技术的进步,由以上 2 种或更多种类合成的新型复合材料在水泥基材料中的应用将更加广泛和深入。综上所述,有机聚合物/无机复合材料在提升水泥基力学性能方面具有广阔的前景。

参考文献:

[1] Van D H, *et al.* Concrete material science: past, present, and future innovations[J]. Cement and Concrete Research, 2018, 112: 5-24.

[2] Igliński B, Buczkowski R, *et al.* Development of cement industry in Poland-history, current state, ecological aspects. A review[J]. Journal of Cleaner Production, 2017, 141: 702-720.

[3] Sui J S S, Hao J L, De C J N, *et al.* Hygrothermal and mechanical performance of sustainable concrete: a simulated comparison of mix designs[J]. Journal of Building Engineering, 2021, 34: 101859.

[4] Makul N, *et al.* Advanced smart concrete-a review of current progress, benefits and challenges[J]. Journal of Cleaner Production, 2020, 274: 122899.

[5] 邵旭东, 樊伟, 黄政宇, 等. 超高性能混凝土在结构中的应用[J]. 土木工程学报, 2021, 54(1): 1-13.
Shao X D, Fan W, Huang Z Y, *et al.* The application of ultra-high performance concrete in structure[J]. China Civil

Engineering Journal, 2021, 54(1): 1-13.

[6] 王萌, 陈宁. 熔纺三叶形聚乙烯醇纤维的制备及增强水泥基材料[J]. 高分子材料科学与工程, 2020, 36(6): 102-109.
Wang M, Chen N, *et al.* Preparation of melt-spun trilobal polyvinyl alcohol fiber and reinforced cement-based materials[J]. Polymer Materials Science & Engineering, 2020, 36(6): 102-109.

[7] Zhang M H, Islam J, Peethamparan S, *et al.* Use of nano-silica to increase early strength and reduce setting time of concretes with high volumes of slag[J]. Cement and Concrete Composites, 2021, 34: 650-662.

[8] 周红, 郑淑珍, 乔文秀, 等. 聚合物表面活性剂在水泥基材料气泡调控中的应用现状[J]. 高分子材料科学与工程, 2024, 40(4): 166-174.
Zhou H, Zheng S Z, Qiao W X, *et al.* Application of polymer surfactant in bubble control of cement-based materials[J]. Polymer Materials Science & Engineering, 2024, 40(4): 166-174.

[9] Mahmood W, Mohammed A, *et al.* Performance of ANN and M5P-tree to forecast the compressive strength of hand-mix cement-grouted sands modified with polymer using ASTM and BS standards and evaluate the outcomes using SI with OBJ assessments[J]. Neural Computing and Applications, 2022, 34: 15031-15051.

[10] Silva D A, Monteiro P J M, *et al.* The influence of polymers on the hydration of Portland cement phases analyzed by soft X-ray transmission microscopy[J]. Cement and Concrete Research, 2006, 36: 1501-1507.

[11] Heidarnezhad F, Jafari K, Ozbakkaloglu T, *et al.* Effect of polymer content and temperature on mechanical properties of lightweight polymer concrete[J]. Construction and Building Materials, 2020, 260: 119853.

[12] 冉千平, 王秀梅, 舒鑫, 等. 一种嵌段聚羧酸减水剂的制备与表征[J]. 高分子材料科学与工程, 2016, 32(1): 30-35.
Ran Q P, Wang X M, Shu X, *et al.* Preparation and characterization of block polycarboxylate superplasticizer[J]. Polymer Materials Science & Engineering, 2016, 32(1): 30-35.

[13] Xu C J, Dai Y Q, Peng Y, *et al.* Multi-scale structure of in-situ polymerized cementitious composites with improved flowability, strength, deformability and anti-permeability[J]. Composites Part B: Engineering, 2022, 245: 110222.

[14] Wang M, Wang R, Yao H, *et al.* Research on the mechanism of polymer latex modified cement[J]. Construction and Building Materials, 2016, 111: 710-718

[15] Liu Q, Liu W J, Li Z J, *et al.* Ultra-lightweight cement composites with excellent flexural strength, thermal insulation and water resistance achieved by establishing interpenetrating network[J]. Construction and Building Materials, 2020, 250: 118923.

[16] Ma J F, Shu X, Zheng S Z, *et al.* Effects of polyurethane-silica nanohybrids as additives on the mechanical performance enhancement of ordinary Portland cement paste[J]. Construction and Building Materials, 2022, 338, 127666.

[17] Zheng S Z, Qiao W X, Ma J F, *et al.* Synthesis of a novel poly-TA-Si nanohybrid with dynamic covalent SS bonds and its effect on the mechanical strength of cement paste[J]. Construction and Building Materials, 2022, 356: 129293.

[18] Summerscales J, Dissanayake N, Virk A, *et al.* A review of bast fibres and their composites. part 2-composites[J]. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 2010, 41: 1336-1244.

[19] Yu R, Liu K N, Yin T Y, *et al.* Comparative study on the effect of steel and polyoxymethylene fibers on the characteristics of ultra-high performance concrete (UHPC)[J]. Cement and Concrete Composites, 2022, 127: 104418.

[20] Shu X J, Zhao Y, Liu Z, *et al.* A study on the mix proportion of fiber-polymer composite reinforced cement-based grouting material[J]. Construction and Building Materials, 2022, 328: 127025.

[21] Zheng S Z, Zhou H, Ma J F, *et al.* Synergistic enhancement of the mechanical properties of cement-based materials by using microcrystalline cellulose and nano-silica composites[J]. Construction and Building Materials, 2024, 411: 134458.

[22] Rui Y, Kangning L, Tianyi Y, *et al.* Comparative study on the effect of steel and polyoxymethylene fibers on the characteristics of ultra-high performance concrete (UHPC)[J]. Cement and Concrete Composites, 2022, 127: 104418.

[23] Mu R, Xing P, Yu J, *et al.* Investigation on reinforcement of aligned steel fiberon flexural behavior of cement-based composites using acoustic emission signal analysis[J]. Construction and Building Materials, 2019, 201: 42-50.

[24] Zhou A, Wei H N, Liu T J, *et al.* Interfacial technology for enhancement in steel fiber reinforced cementitious composite from nano to macroscale[J]. Nanotechnology Reviews, 2021, 10: 636-652.

[25] Yoo D Y, Kim M J, *et al.* High energy absorbent ultra-high-performance concrete with hybrid steel and polyethylene fibers[J]. Construction and Building Materials, 2019, 209: 354-363.

[26] Wang J, Dai Q, Si R, *et al.* Investigation of properties and

performances of polyvinyl alcohol (PVA) fiber-reinforced rubber concrete[J]. Construction and Building Materials, 2018, 193: 631-642.

[27] Song P F, Wang Y, Wang X H, *et al.* Rheological behavior of basalt fiber sprayed cementitious composites (BFSCC)[J]. Construction and Building Materials, 2023, 400: 132666.

[28] Zhuang J P, Shen S Z, Yang Y, *et al.* Mechanical performance of basalt and PVA fiber reinforced hybrid-fiber engineered cementitious composite with superimposed basalt fiber content[J]. Construction and Building Materials, 2022, 353: 129183.

[29] Liu B, Zhou H, Meng H N, *et al.* Fresh properties, rheological behavior and structural evolution of cement pastes optimized using highly dispersed in situ controllably grown Nano-SiO_2[J]. Cement and Concrete Composites, 2023, 135: 104828.

[30] Nazari A, Riahi S.Microstructural, thermal, physical and mechanical behavior of the self compacting concrete containing SiO_2 nanoparticles[J]. Materials Science and Engineering: A, 2010, 527: 7663-7672.

[31] Mohammed A, Rafiq S, Mahmood W, *et al.* Characterization and modeling the flow behavior and compression strength of the cement paste modified with silica nano-size at different temperature conditions[J]. Construction and Building Materials, 2020, 257: 119590.

[32] Lin R S, Oh S, Du W, *et al.* Strengthening the performance of limestone-calcined clay cement (LC^3) using nano silica[J]. Construction and Building Materials, 2022, 340: 127723.

[33] Gu Y, Liu W W, Cao Z X, *et al.* Effect of particle size of $NanoSiO_2$ on cement-based stabilization/solidification of municipal solid waste incineration fly ash[J]. Construction and Building Materials, 2024, 411: 134311.

[34] El G S M A, Hashem F S, Amin M S, *et al.* Influence of carbon nanotubes, nanosilica and nanometakaolin on some morphological-mechanical properties of oil well cement pastes subjected to elevated water curing temperature and regular room air curing temperature[J]. Construction and Building Materials, 2017, 146: 531-546.

[35] Aodkeng S, Sinthupinyo S, Chamnankid B, *et al.* Effect of carbon nanotubes/clay hybrid composite on mechanical properties, hydration heat and thermal analysis of cement-based materials[J]. Construction and Building Materials, 2022, 320: 126212.

[36] Vaisman L, Wagner H D, Marom G, *et al.* The role of surfactants in dispersion of carbon nanotubes[J]. Advances in Colloid and Interface Science, 2006, 128: 37-46.

[37] Zhao Y, Liu Y, Shi T, *et al.* Study of mechanical properties and early-stage deformation properties of graphene-modified cement-based materials[J]. Construction and Building Materials, 2020, 257: 119498.

[38] Fu Q, Wang Z, Xue Y, *et al.* Catalysis and regulation of graphene oxide on hydration properties and microstructure of cement-based materials[J]. ACS Sustainable Chemistry & Engineering, 2023, 11: 5626-5643.

[39] Rong Z D, Sun W, Xiao H J, *et al.* Effects of nano-SiO_2 particles on the mechanical and microstructural properties of ultra-high performance cementitious composites[J]. Cement and Concrete Composites, 2015, 56: 25-31.

[40] Ma J F, Liu H L, Zheng S Z, *et al.* Synthesis of a small molecular polydentate polymer IHP-MP and its application to cement or graphene oxide dispersion via strong interactions between adsorption groups and interfaces[J]. Journal of Materials Science, 2020, 55: 4701-4716.

[41] 孟涛, 钱匡亮, 钱晓倩, 等. 纳米碳酸钙中间浆体对粉煤灰混凝土长期性能的影响研究[C]// 2008 年超高层混凝土泵送与超高性能混凝土技术的研究与应用国际研讨会论文集. 广州: 2008 年超高层混凝土泵送与超高性能混凝土技术的研究与应用国际研讨会, 2008.

[42] Buettner N, Iyacu G, Akono A T, *et al.* Colloidal nanosilica promotes high-density calcium-silicate-hydrates in fine recycled concrete aggregate mortar[J]. Cement and Concrete Research, 2024, 180: 107498.

[43] Miao X, Xing Y B, Zheng H B, *et al.* Effects of Hybrid graphene oxide-nanosilica on calcium silicate hydrate in the simulation environment and cement[J]. ACS Omega, 2023, 8: 22975-22983.

[44] Zou F B, Zhang M, Hu C L, *et al.* Novel C-A-S-H/PCE nanocomposites: design, characterization and the effect on cement hydration[J]. Chemical Engineering Journal, 2021, 412: 128569.

[45] Kanchanason V, Plank J. Effectiveness of a calcium silicate hydrate – polycarboxylate ether (C-S-H-PCE) nanocomposite on early strength development of fly ash cement[J]. Construction and Building Materials, 2018, 169: 20-27.

[46] Sun J F, Shi H, Qian B B, *et al.* Effects of synthetic C-S-H/PCE nanocomposites on early cement hydration[J]. Construction and Building Materials, 2017, 140: 282-292.

Application and Progress in Enhancing the Mechanical Properties of Cement-Based Materials Using Organic-Inorganic Composite Materials

Huina Li[1], Shuzhen Zheng[1], Hong Zhou[1], Shoufang Xu[1,2], Dengxue Ma[1,2], Yinwen Li[1,2], Jianfeng Ma[1,2]

(*1. College of Chemistry and Chemical Engineering, Linyi University, Linyi 276000, China;*
2. Functional Polymer Laboratory, College of Materials Science and Engineering, Linyi University, Linyi 276000, China)

ABSTRACT: The enhancement of mechanical properties in cement-based materials can improve engineering safety, promote economic benefits, and the development of materials science, which holds significant importance for the load-bearing capacity of structures and the long-term stable operation of buildings. This article reviewed the recent progress in enhancing the mechanical properties of cement-based materials using organic polymer/inorganic composites. It described the applications and mechanisms of polymers, fibers, inorganic nanomaterials, and C-S-H crystal nuclei in improving these properties. It also summarized the main issues in current research and provided suggestions and outlooks for future studies. With ongoing interdisciplinary research in polymer chemistry, physical chemistry, and cement chemistry, additives for enhancing the mechanical properties of cement-based materials are no longer limited to single nanomaterials or polymers, which have notable limitations. In the future, polymer-nano hybrid materials may become a new research focus, leveraging the advantages of both organic polymers and inorganic nanomaterials to achieve the optimal improvement of mechanical performance.

Keywords: cement-based materials; composites; mechanical properties; fibers; inorganic nanomaterials; hydrated calcium silicate